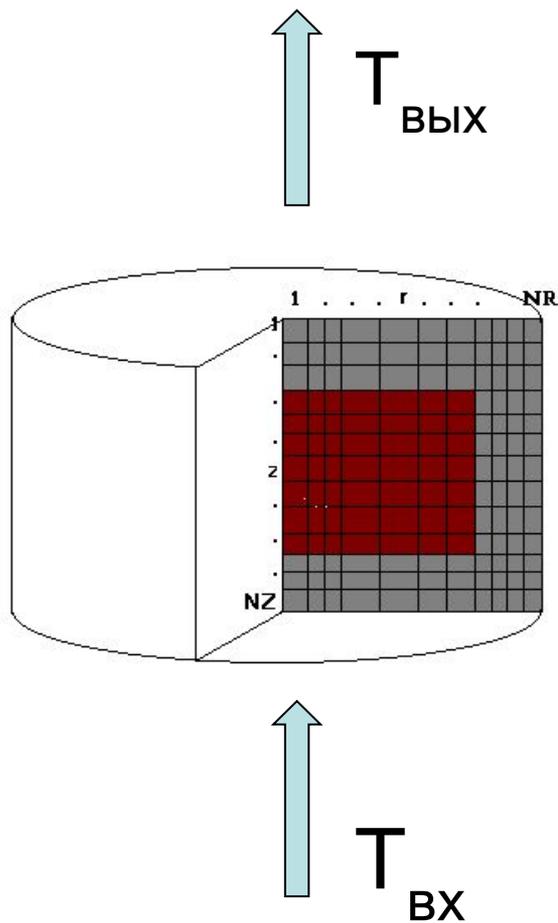


# Тепловыделение в ядерном реакторе



$$W = \frac{T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}}{C_p \cdot G}$$

$G$  – расход теплоносителя, кг/сек

$C_p$  – удельная теплоёмкость, Вт/кг · К

# Энергия деления

- кинетическая энергия осколков деления
- энергия нейтронов деления
- энергия мгновенных  $\gamma$ -квантов
- энергия рад.распада продуктов деления
  
- энергия выделяющаяся при захвате нейтронов и  $\gamma$ -квантов
- *другие виды энергии*

# Кинетическая энергия осколков деления

Тяжёлый осколок – 100 МэВ

Лёгкий осколок – 65 МэВ

Характер энергетического распределения осколков деления при делении с образованием одного из осколков с массовым числом 97:

$$F_{\text{оск}}(E) = A \exp [-0,007 (E - E_{\text{оск}})^2],$$

где  $E_{\text{оск}}$  — средняя кинетическая энергия осколков деления, МэВ;  
 $A$  — нормирующий множитель.

## Максимальный пробег осколков деления в некоторых материалах

Материал		Al	Cu	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	U
Длина пробега:	мг/см <sup>2</sup>	3,7	5,2	10,0	12,6
	МКМ	13,7	5,8	11,9	6,7

Время торможения  $\sim 10^{-12}$  сек

# Энергия нейтронов деления

$$E_n \sim 5 \pm 0,5 \text{ МэВ}$$

## Энергетическое распределение нейтронов деления

$E, \text{ МэВ}$	2	4	5	8	10	16
%	40	11	5,5	0,60	0,12	9,2 $\cdot 10^{-4}$

энергия выделяющаяся при захвате нейтронов  $\approx 5-10$  МэВ на одно деление

# Энергия мгновенных $\gamma$ -квантов

$$E_{\gamma}^{\text{мгн}} = 7,8 \text{ МэВ}$$

## Энергетический спектр мгновенного $\gamma$ -излучения, возникающего при делении

Интервал энергии, МэВ	Число $\gamma$ -квантов на одно деление в указанном интервале энергии	Число $\gamma$ -квантов на одно деление, обладающих энергией $E$
0,25—0,75	3,1	3,2 при 1 МэВ
0,75—1,25	1,9	
1,25—1,75	0,84	0,8 при 1,5 МэВ
1,75—2,25	0,55	
2,25—2,75	0,29	0,85 при 2,3 МэВ
2,75—3,25	0,15	0,15 при 3 МэВ
3,25—3,75	0,062	
3,75—4,25	0,065	
4,25—4,75	0,024	
4,75—5,25	0,019	0,2 при 5 МэВ
5,25—5,75	0,017	
5,75—6,25	0,007	
6,25—6,75	0,004	

# Энергия радиоактивного распада продуктов деления

В среднем на одно деление при  $\beta$ -распаде - 26 Мэв

энергия  $\beta$  -частиц - 8 Мэв  
энергия  $\gamma$ -квантов - 6 Мэв  
нейтрино - 12 Мэв

Временная зависимость выделения энергии  
 $\beta$  -частицами  $V(\tau)$  и  $\gamma$  -квантами  $\Gamma(\tau)$  , Мэв/(с · дел)

$$V(\tau) = 1,4 \cdot T^{-1.2}$$

$$\Gamma(\tau) = 1,26 \cdot T^{-1.2} \quad (\tau > 1 \text{ сек})$$

# Энергия деления урана-235 тепловыми нейтронами

Место, где выделяется энергия	Энергия, выделяющаяся сразу после деления (мгновенно), МэВ	Энергия, выделяющаяся постепенно после деления (с запаздыванием), МэВ	Итого, МэВ
Вблизи места деления (в ТВЭлах)	$E_{\text{оск}} = 168$	$E_{\beta} = 8$	176
Рассеяна по всему реактору	$E_n = 5$ $E_{\gamma}^{\text{мгн}} = 8$	$E_{\gamma}^{\text{зап}} = 6$	19
Итого	181	14	195

*\* дополнительно выделяется при захвате нейтронов  $\approx 5-10$  Мэв на одно деление*

При делении 1г  $U^{235}$  выделяется  $\approx 1$  Мвт · сут энергии

# Распределение тепловыделения в реакторе

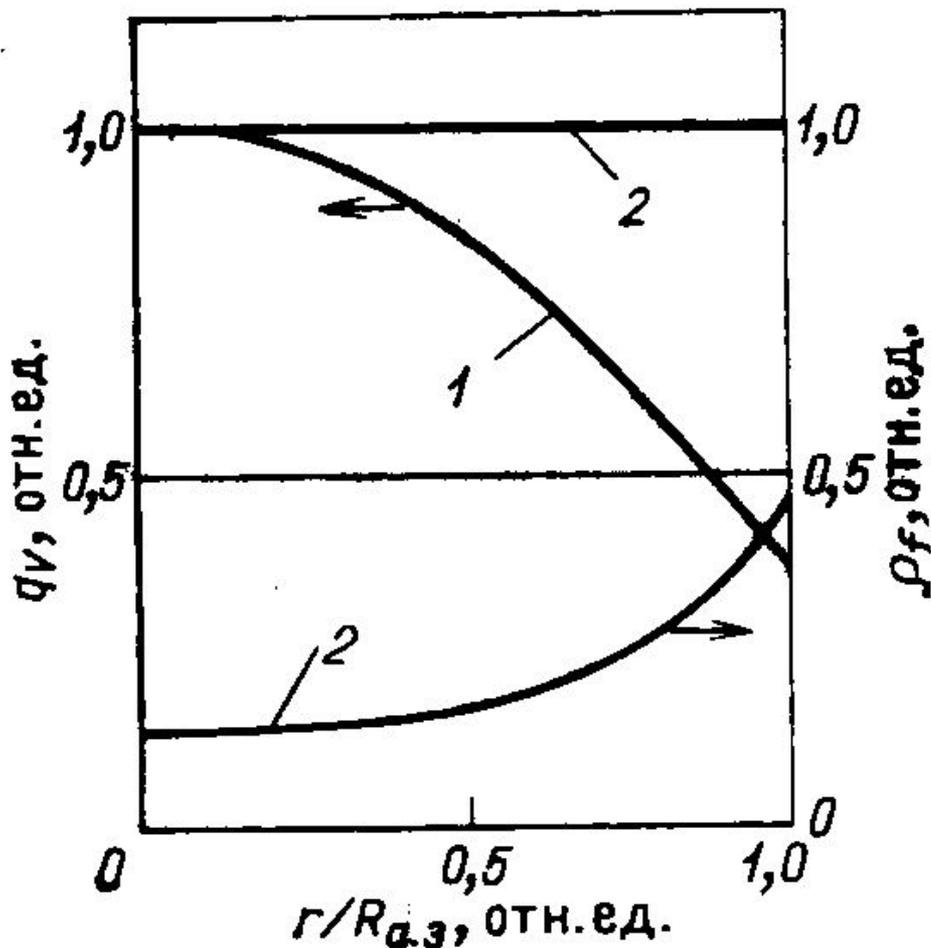


Рис. 8.3. Распределение тепловыделения по радиусу реактора ( $q_v$ ) и концентрации делящегося вещества для профилированного реактора ( $\rho_f$ ):

1 — непрофилированный реактор ( $K_r = 1,62$ ); 2 — профилированный реактор ( $K_r = 1,00$ )

# Зонное профилирование

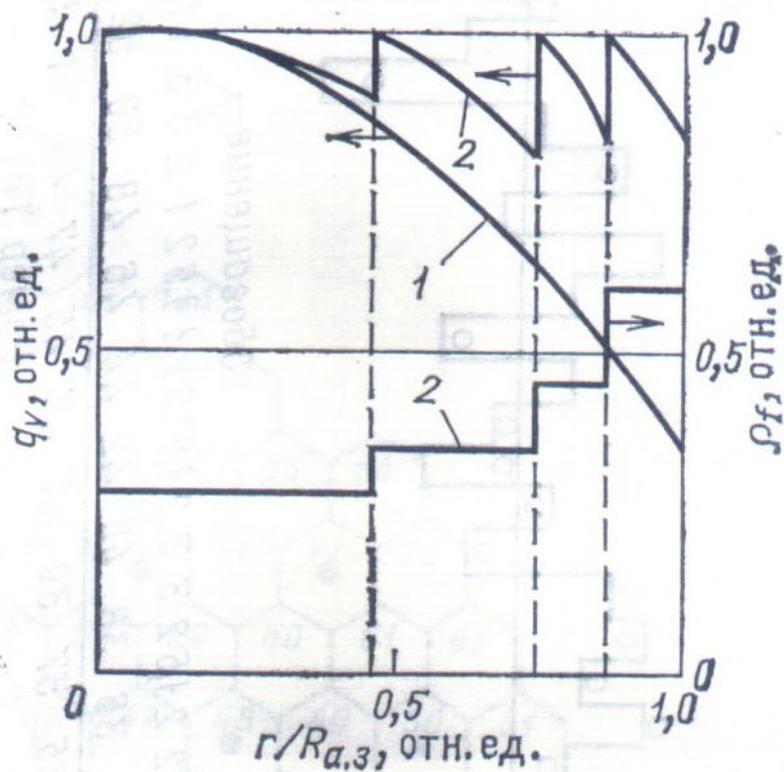
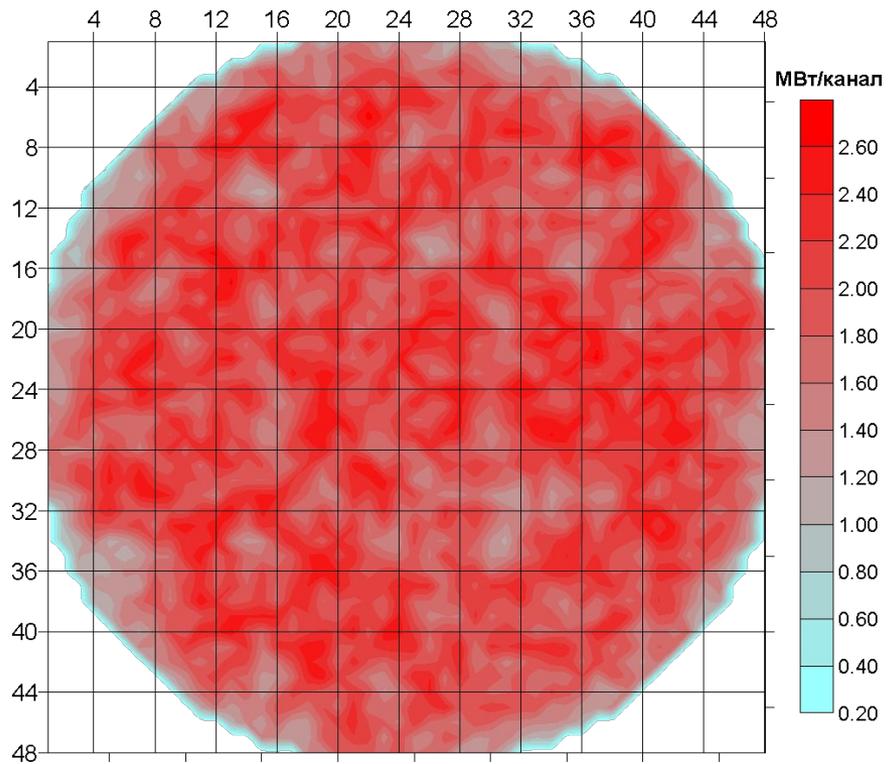


Рис. 8.5. Распределение теплового выделения ( $q_v$ ) и концентрации делящегося вещества ( $\rho_f$ ) по радиусу реактора при осуществлении зонного профилирования:

- 1 — непрофилированный реактор;
- 2 — профилированный реактор

**Сглаженный профиль поканального энергораспределения  
на 3 блоке ЛАЭС 11.01.2000г.**



# Тепловыделение в замедлителе и других элементах активной зоны

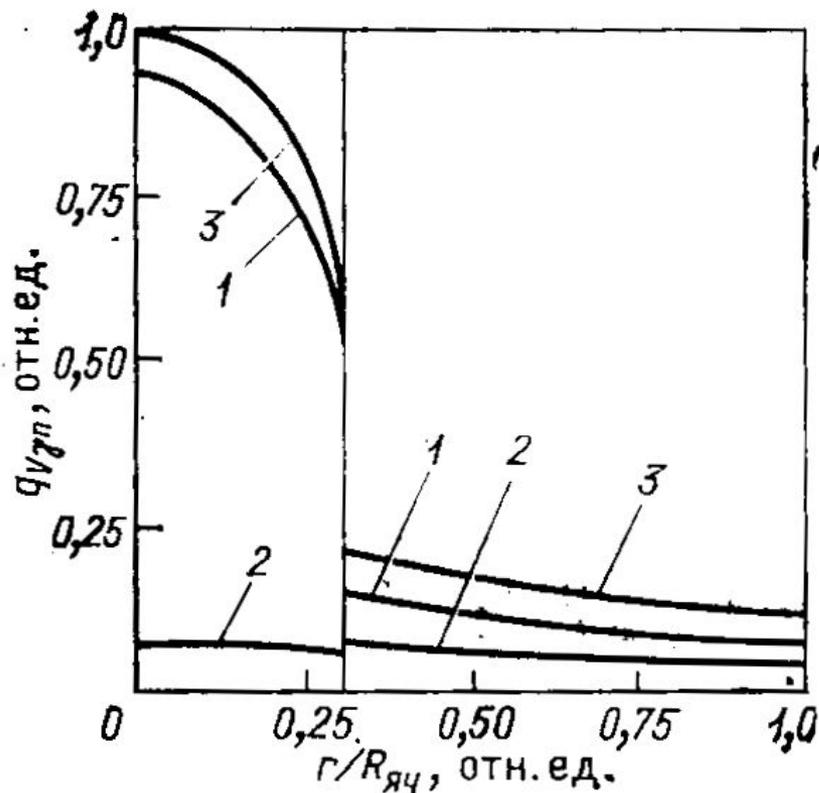


Рис. 8.9. Распределение тепловыделения от  $\gamma$ -квантов и замедляющихся нейтронов в ячейке реактора РБМК: 1 — от  $\nu$ -квантов; 2 — от замедляющихся нейтронов; 3 — от  $\gamma$ -квантов и замедляющихся нейтронов

## Тепловыделение в отражателе

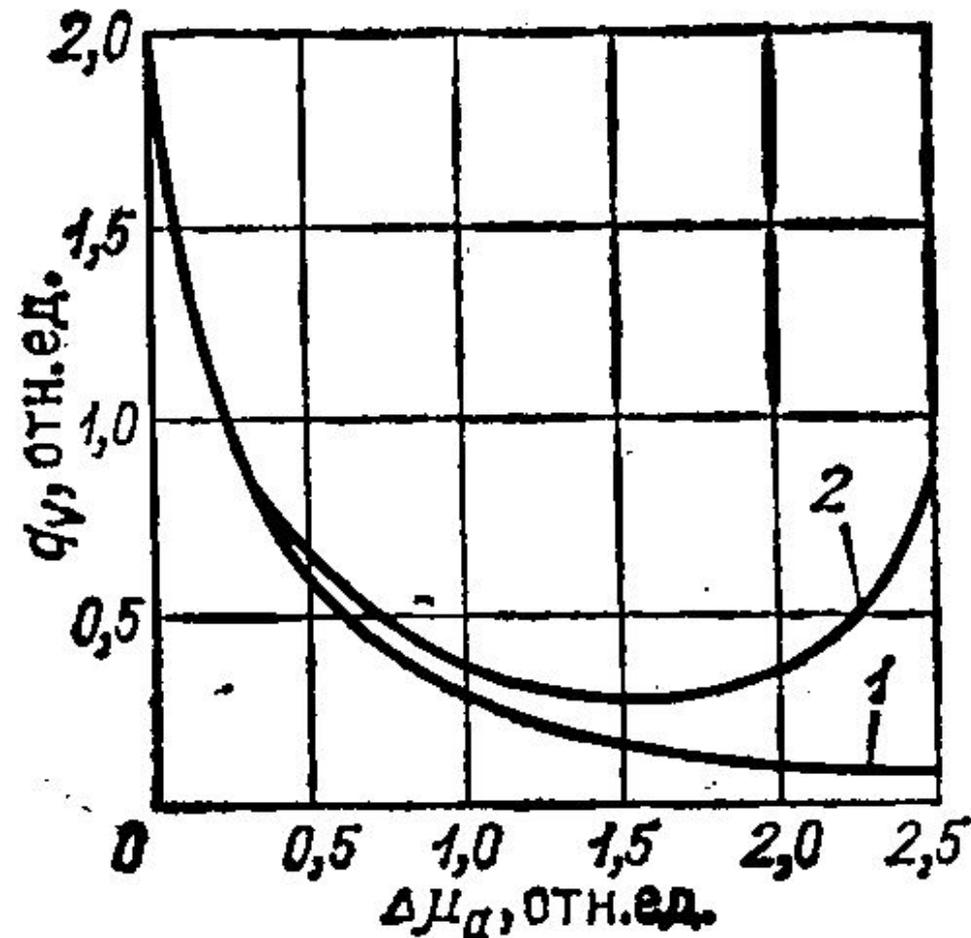


Рис. 8.11. Распределение тепловыделения по толщине отражателя без учета (1) и с учетом (2) источников  $\gamma$ -квантов в конструкционных материалах за отражателем (начало координат принято на границе отражателя и активной зоны)

# Тепловыделение в органах регулирования

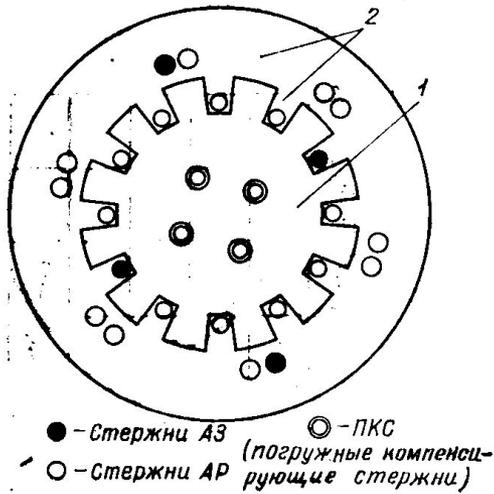


Рис. 8.12.

Рис. 8.12. Схема расположения органов регулирования в реакторе ВГР-50 [51]:

1 — активная зона; 2 — отражатель с пилонами

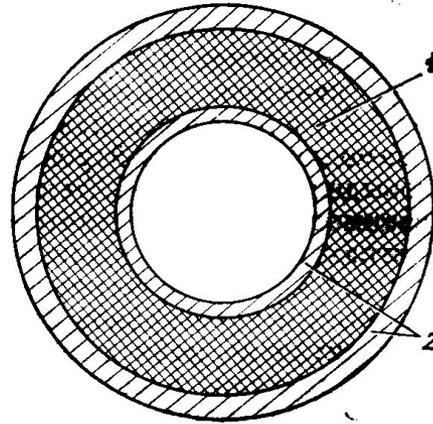


Рис. 8.13.

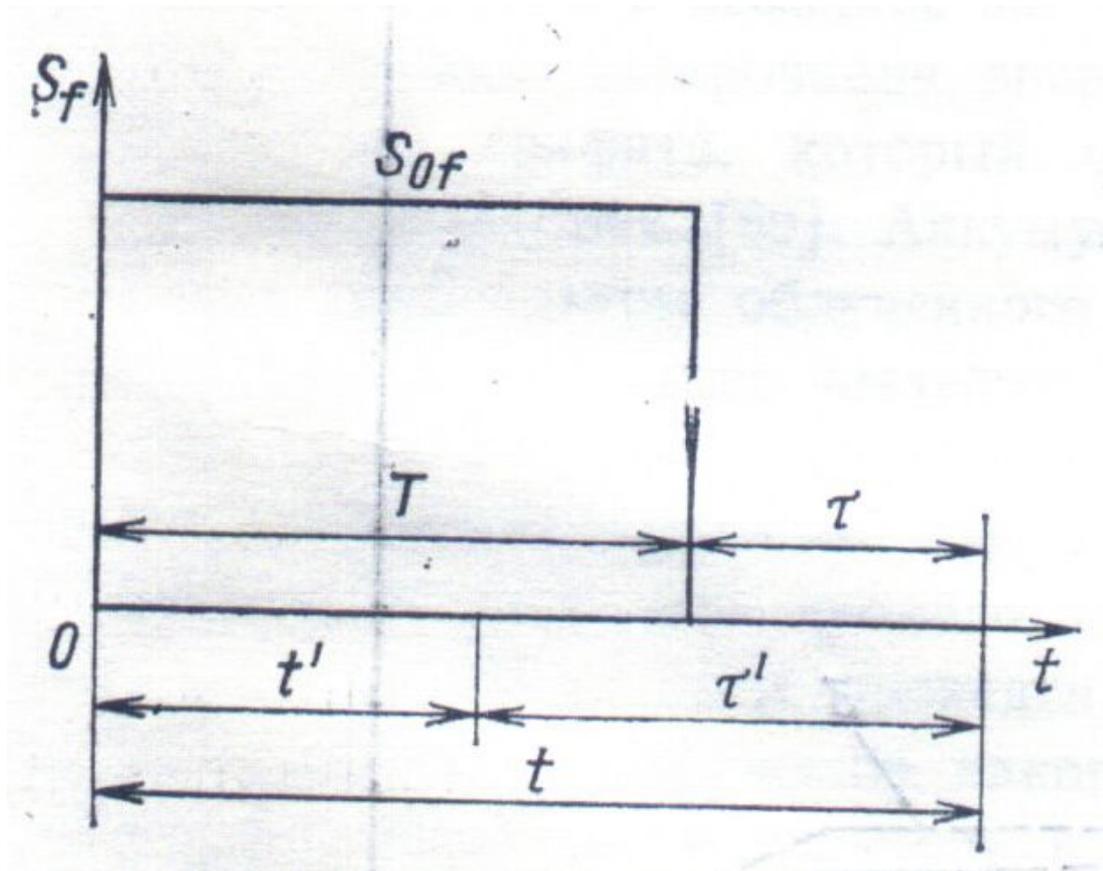
Рис. 8.13. Схема поперечного сечения поглощающего стержня:

1 — поглотитель; 2 — оболочка

## 8.1. Вклад различных реакций в тепловыделение в поглощающем стержне

Компонента (материал)	Процесс взаимодействия	Доля тепловыделения, %
Пэл ( $B_4C$ )	Реакция ( $n, \alpha$ )	60
Пэл ( $B_4C$ )	Взаимодействие $\gamma$ -излучения и замедление нейтронов	10
Оболочка (сталь)	Взаимодействие $\gamma$ -излучения и замедление нейтронов	30

# Энерговыведение в реакторе после его остановки



$$W_{\gamma, \beta}(\tau) = S_{0f} \int_{\tau}^{T+\tau} [B(\tau') + \Gamma(\tau')] d\tau'.$$

$$\frac{W_{\gamma, \beta}(\tau)}{W_0} = 6,65 \cdot 10^{-2} \left[ \frac{1}{\tau^{0,2}} - \frac{1}{(T + \tau)^{0,2}} \right].$$

$$\frac{W_{\gamma, \beta}}{W_0} \approx 6,65 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\tau^{0,2}},$$

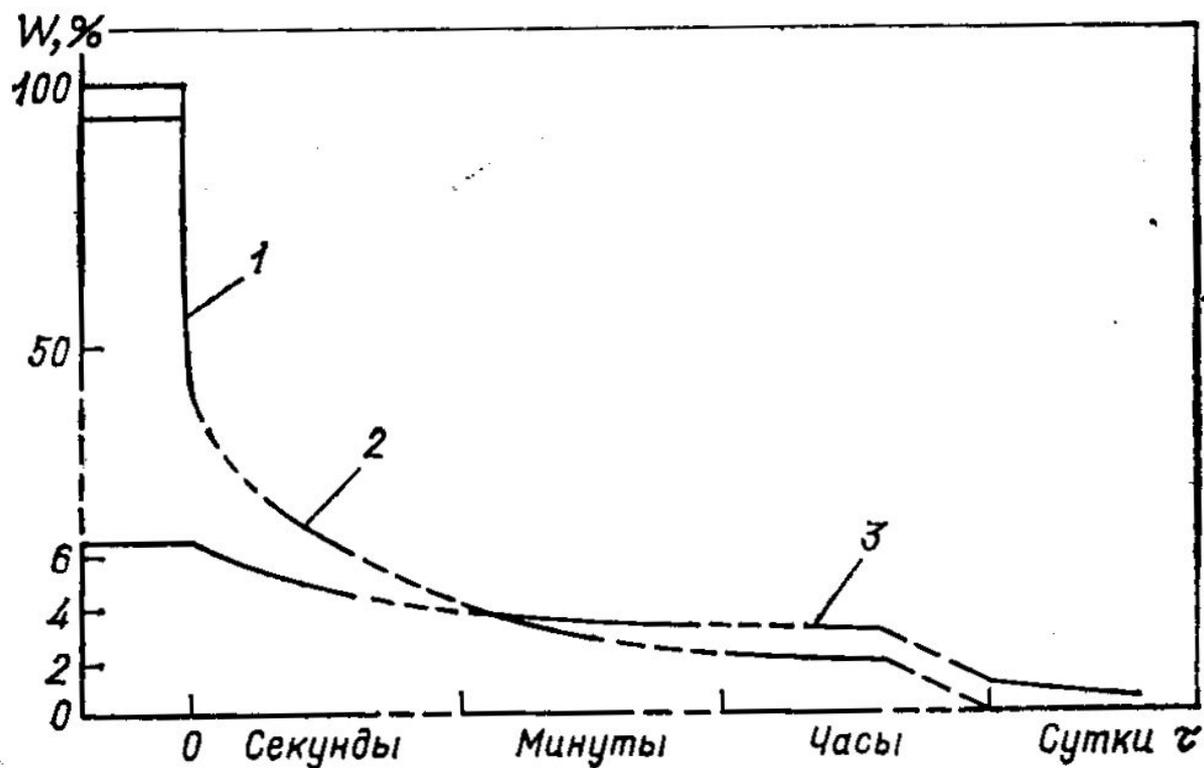
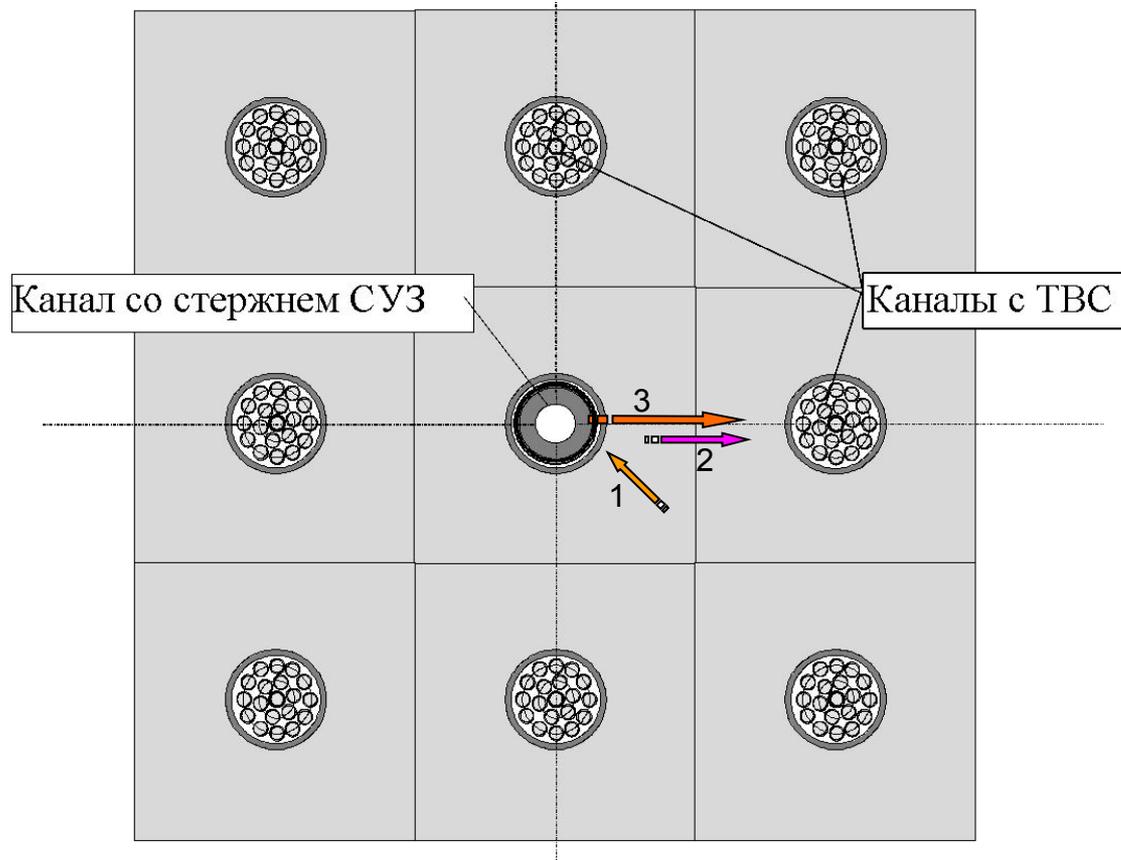
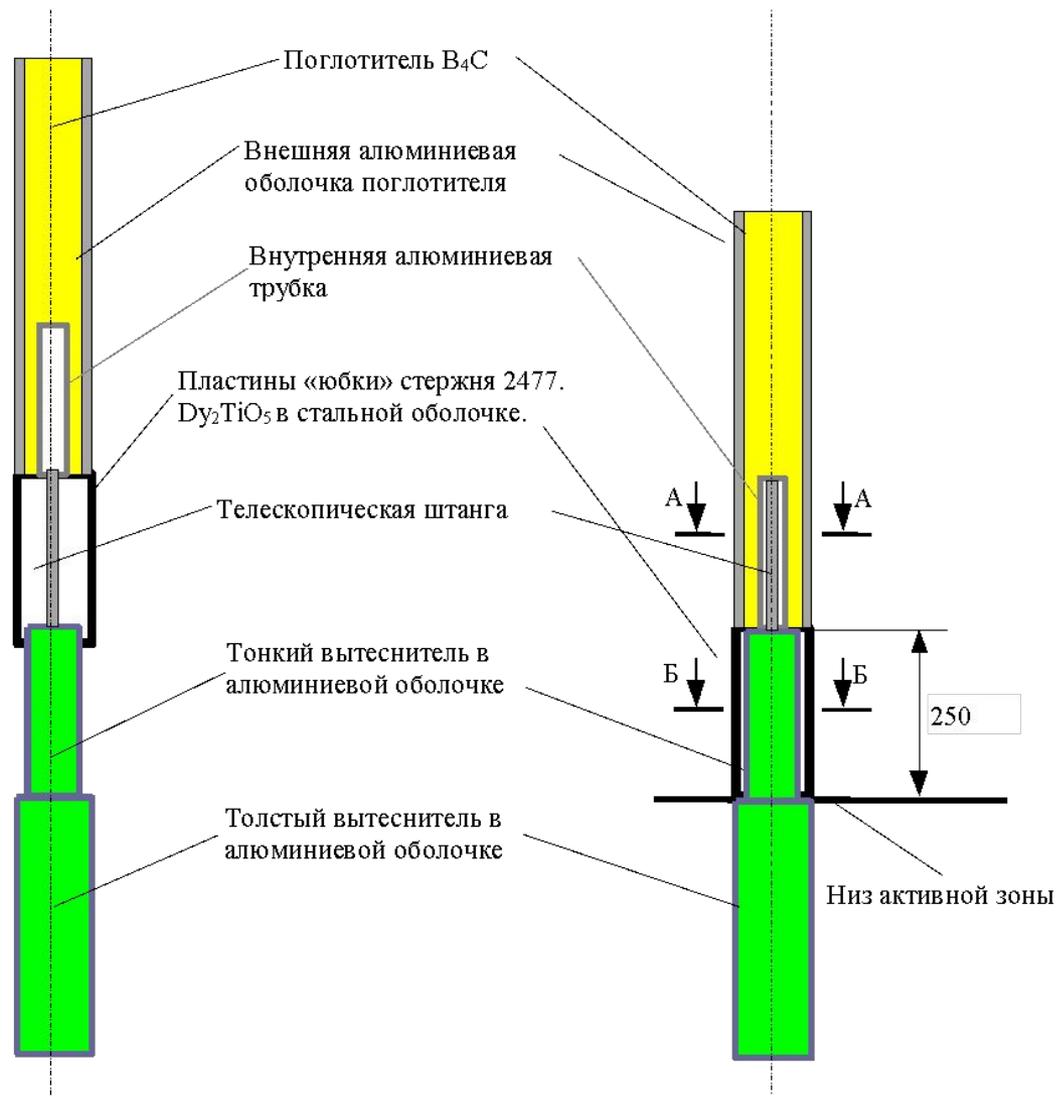


Рис. 9.4. Структура изменения мощности после остановки реактора:  
 1 — за счет мгновенных нейтронов; 2 — за счет запаздывающих нейтронов; 3 — за счет радиоактивного распада продуктов деления (остаточное тепловыделение)

# Каналы отвода тепла от ячейки со стержнем СУЗ реактора РБМК



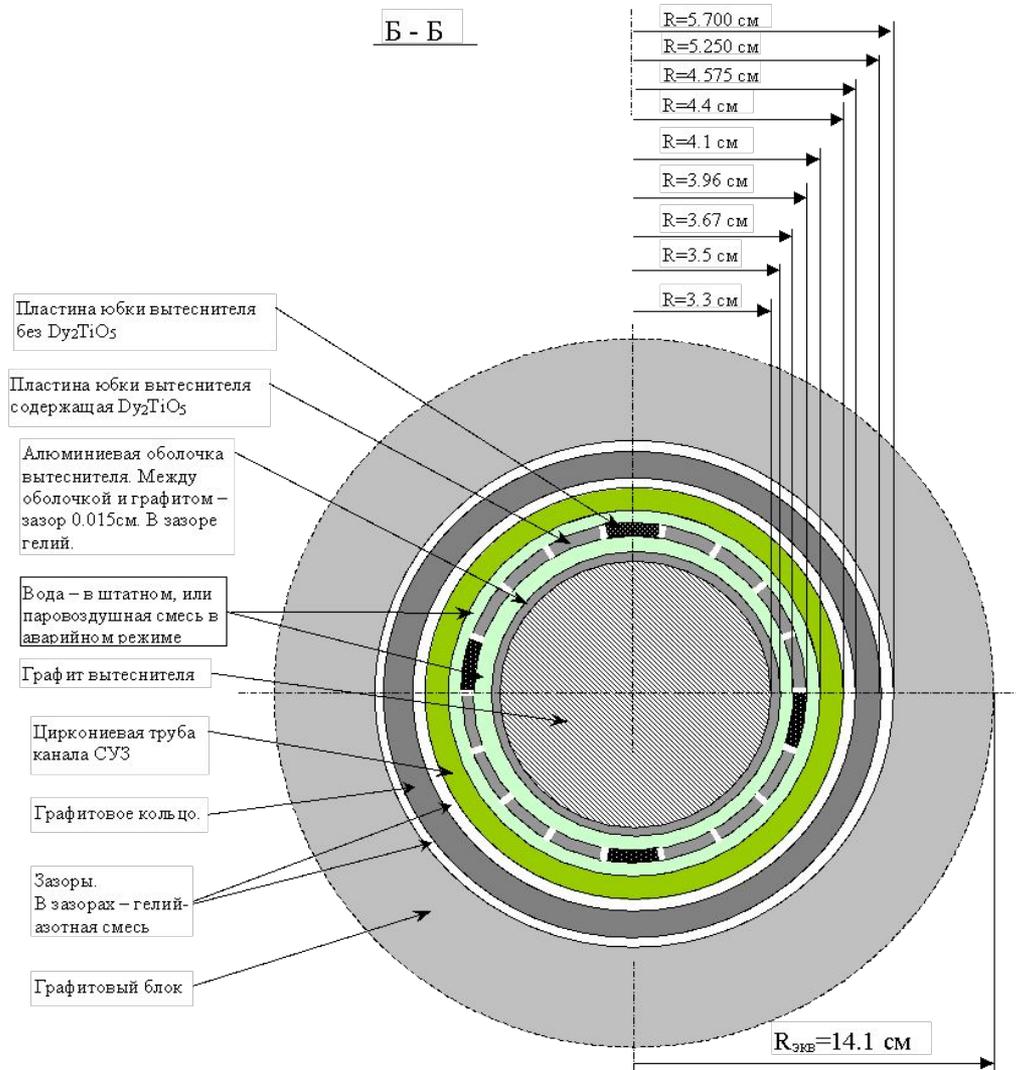
1. Отвод части тепла от графита ячейки с СУЗ в нормальном режиме, а также в начальный момент аварии при обезвоживании контура СУЗ,
2. Частичный отвод тепла от графита ячейки с СУЗ в нормальном режиме и основной - в аварийном, при обезвоживании контура СУЗ,
3. Отвод тепла от стержня СУЗ в графит ячейки на последующих стадиях аварии.



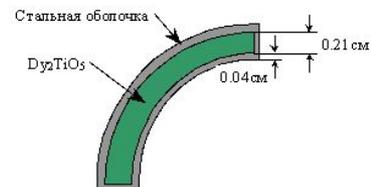
(а) Стержень  $2477$  в промежуточном положении

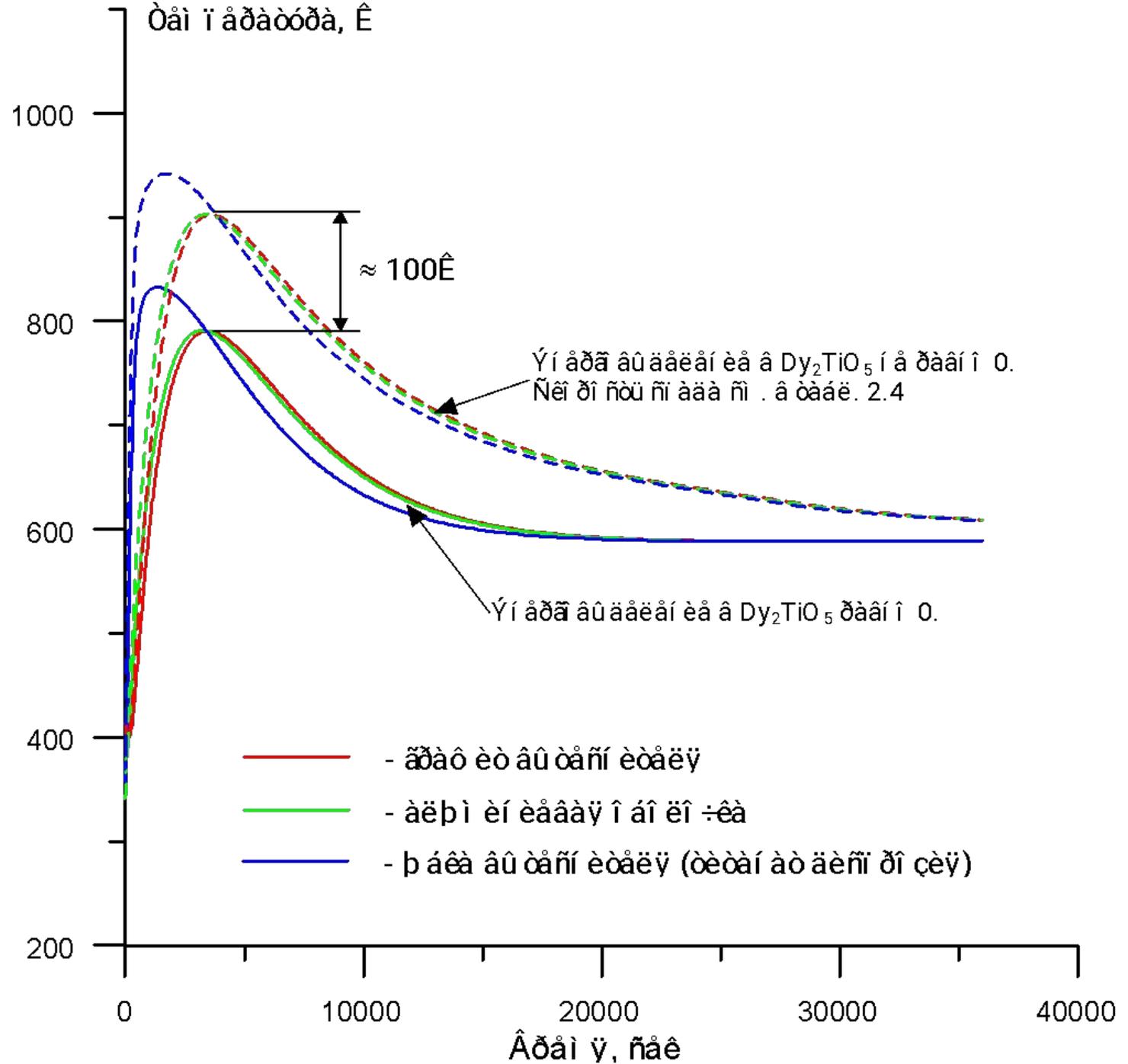
(б) Стержень  $2477$  в крайнем нижнем положении

Б - Б



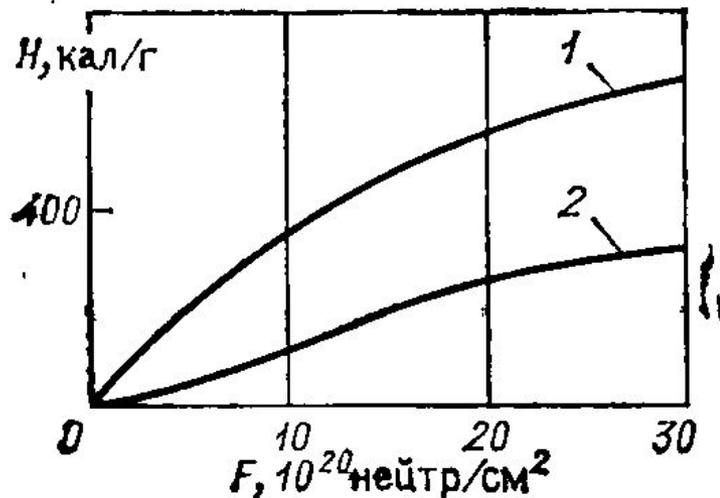
Пластина юбки вытеснителя содержащая титанат диспрозия





Энергия аккумулированной радиационными дефектами (энергия Вигнера).

$$H = H_{\infty} [1 - \exp(-KF)],$$



180-200 кал/г ( $8.4 \cdot 10^5$  Дж/кг)  
При адиабатическом выделении этого тепла температура графита повысится на,

$$\Delta T = \frac{Q}{C_p} = \frac{8.4 \cdot 10^5}{1000} = 840 \text{ K}$$

Рис. 10.1. Зависимость аккумулированной в графите энергии от флюенса нейтронов [69]:

1 — облучение при 30 °С; 2 — то же после отжига при 1000 °С в течение 3 ч

